Neuere Untersuchungen

über

Lamellentöne und Labialpfeifen.

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der philosophischen Doktorwürde der hohen philosophischen Fakultät der Universität Rostock vorgelegt

von

ALFONS KREIS

aus **Brieg,** Bezirk Breslau.

ACAD. LEIBB. BAT. BRSL.

Rostock 1905.

Referent: Herr Prof. Dr. Martens.

Meinen lieben Eltern

in Dankbarkeit!

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549205_0094

Inhalt.

Einleitung.

I. Teil: Lamellentöne.

1. Die wulstartig gebildete Schneide.
2. Eine neue Art resonanzloser Klänge.
3. Einfluß einer seitlichen Verschiebung des Keiles innerhalb der Lamelle.
4. Versuch einer Erklärung der seitlichen Sprünge.

II. Teil: Labialpfeifen.

5. Stellung des Labiums in der Pfeife.
6. Unterschied zwischen offenen und gedackten Pfeifen.
7. Der angeblasene Resonator.
8. Bedeutung der sekundären Ströme.

Schlußbemerkung.

Einleitung.

Man kann in den Untersuchungen über tönende Labialpfeifen zwei Richtungen unterscheiden, die lange unabhängig von einander den Gegenstand behandelten: die theoretische, wie man sie von Euler, Lagrange, Helmholtz, Lord Rayleigh u. a.[1]) vertreten findet, beschäftigt sich nur mit der molekularen Schwingung tönender Luftmassen in Röhren; die experimentelle Untersuchung der diese Schwingung bewirkenden Luftbewegung in Pfeifen setzt erst später ein. Wir finden diese Bewegung untersucht in den Arbeiten von Sonreck[2]), Lootens[3]), Brockmann[4]), Melde[5]) und in neuerer Zeit von V. Hensen[6]) und Friedrich[7]). Hensen vor allen wies auf die Lamellentöne hin, die unabhängig vom Pfeifenkörper entstehen, wenn ein Luftband gegen eine Schneide fließt, ohne jedoch den ursächlichen Zusammenhang zwischen Schneideton und Pfeifenton konstatieren zu können. Diesen Zusammenhang hat Wachsmuth[8]) evident nachgewiesen, indem er erstens zeigte, daß ein mit gleichem Druck in gleichem Abstand mit oder ohne Pfeifenrohr angeblasener Keil denselben Ton bewirkt, und zweitens aus den photographischen Aufnahmen der tönenden Pfeife mit weitgehender Genauigkeit die Tonhöhe berechnete. Trotzdem hält Hensen

---

[1]) Zusammengefaßt in: Lord Rayleigh, Theory of Sound, 1880, zweiter Band.

[2]) Sonreck, Pogg. Ann. 158, p. 129, 1876.

[3]) Van Tricht, Expérience de M. Ch. Lootens etc. Journ. d. phys. T. VI, p. 53.

[4]) Brockmann, Wied. Ann. 31, p. 78, 1887.

[5]) Melde, Acustik, Leipzig, 1883.

[6]) V. Hensen, Ann. d. Physik 2, p. 719, 1900.

[7]) Friedrich, Ann. d. Phys. 7, p. 97, 1902.

[8]) Wachsmuth, Ann. d. Phys. 14, p. 469, 1904.

in seiner Arbeit: „Über die Umwandlung periodischer Massenanhäufungen in akustisch wirksame Bewegungen“[1]) die Behauptung aufrecht, daß „es sich bei tönenden Labialpfeifen um eine völlig andere Art der Tonentstehung handele als bei Schneidenklängen“. Er führt fünf Gründe für diese Behauptung an: 1. Das als „lieblich gedackt“ bezeichnete Orgelregister hat die Schneide so weit nach außen sitzen, daß die Lamelle zunächst völlig an der Schneide vorbeibläst. 2. Resonatoren können zum Tönen gebracht werden, wenn man eine Luftlamelle unter einem gewissen Winkel in die Mündung hineinbläst. Dabei spielt keinerlei Art von Schneide eine Rolle, sondern wirksam ist nur die innere Reibung. 3. Ebenso deutlich, wie eine an die Maulöffnung einer tönenden Pfeife gehaltene Kerzenflamme im rotierenden Spiegel Schwingungen der Ortho-Lamelle anzeigt, ebenso deutllich läßt sie, an eine im Schneidenton klingende Lamelle gehalten, erkennen, daß bis dicht an die Schneide die Lamelle nicht schwingt. 4. Der Ton einer Labialpfeife erlischt, wenn man innen an deren Hinterwand eine Kerze brennen läßt. Dadurch stört man nämlich den inneren sekundären Strom, der zum Tönen unentbehrlich ist. 5. Wenn man den äußeren sekundären Strom von der O-Lamelle abhält, verschwindet gleichfalls der Ton, schiebt man eine Platte vom Spalt her bis zur halben Höhe der O-Lamelle vor, so ertönt bei offenen Labialpfeifen die Oktave. Diesen fünf Gründen muß an noch ein Bedenken hinzufügen, das Friedrich[2]) schon früher gegen eine Erklärungsweise wie die von Wachsmuth erhoben hat. Wenn man nämlich das Labium einer Pfeife wulstartig statt keilförmig bildet, entsteht auch ein Ton. Diese Tatsache scheint geeignet, die von Wachsmuth vertretene Theorie, wonach der Ton einer Labialpfeife ein durch Resonanz verstärkter Schneidenton ist, zu erschüttern.

Die folgenden Untersuchungen, obwohl bereits vor dem Erscheinen der oben zitierten Arbeit von Hensen, im

[1]) V. Hensen, Ann. d. Phys. 16 p. 838, 1905.

[2]) Friedrich, Über Entstehung des Tones in Labialpfeifen. Rost. Diss. 1901, p. 14.

Anschluß an die Untersuchungen von Herrn Professor Dr. Wachsmuth im hiesigen physikalischen Institute begonnen, mußten sich naturgemäß an diese Punkte anschließen. Ich stelle mir demgemäß die Fragen: Ist die Wachsmuthsche Theorie gültig auch für den Fall, daß die Schneide als Wulst gebildet wird? Die Untersuchung darüber führt zu einer neuen Familie resonanzloser Klänge. — Welchen Einfluß hat eine seitliche Verschiebung der Schneide, wie sie bei offenen und gedackten Pfeifen in der Praxis sehr üblich ist, auf die Tonbildung des Schneidentones? Diese Untersuchung führt zu Folgerungen allgemeiner Art über die Luftströmung in der Lamelle. — Tönt die Labialpfeife wie ein angeblasener Resonator? — Welche Bedeutung haben die sekundären Ströme für die Tonbildung? Im Anschluß hieran sollen auch die übrigen von Hensen angeführten Tatsachen in Einklang mit Wachsmuths Theorie gesetzt werden.

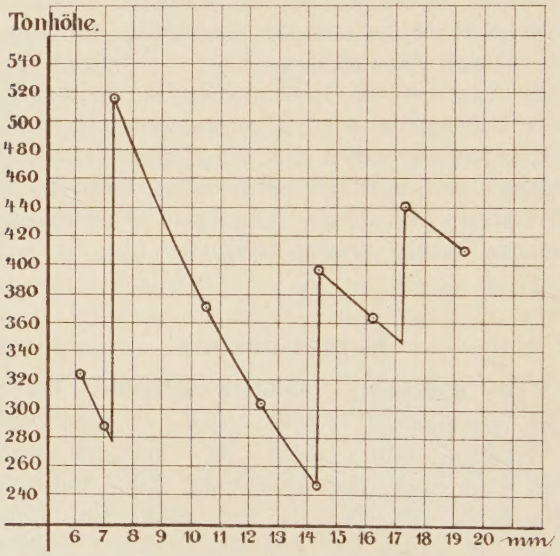
I. Teil.

Lamellentöne.

1. **Die wulstartig gebildete Schneide.** Die Frage, ob sich Wachsmuths Theorie auch für den Fall aufrecht erhalten läßt, wenn die Schneide wulstartig gebildet wird, muß ihre Erledigung dann finden, wenn der Nachweis erbracht ist, daß auch die Schneidentöne sich auf diesen Fall ausdehnen lassen. Verschiedenartige Formen einer keilförmigen Einlage sind bereits von Weerth[1]) untersucht worden. Nun wurde eine Pfeife gebaut, deren vorderer Teil unten offen blieb und verschiedene Labien aufnehmen konnte. Der Zwischenraum zwischen Pfeife und Einlage wurde durch Leder gedichtet. Ein dicker Lederwulst, in dieser Weise eingesetzt, gab, ganz nach der obigen Angabe, einen guten Ton, wenn man auch den Minimaldruck, mit dem die Pfeife sonst ansprach, etwas erhöhen mußte. Dieser Wulst wurde nun zur Untersuchung des Lamellentones benutzt. Die Anordnung war dieselbe

[1]) Rost. Dissertation 1902, Seite 19 f.

wie bei Wachsmuth: Einem fest montierten, völlig symmetrischen Blasekasten gegenüber war ein Schlitten angebracht, der in der Längsrichtung verschiebbar war. Darauf wurde die Einlage genau in der Mittelachse der Lamelle festgestellt. Die Lamelle gab in einem weiten Intervall einen guten Ton. Das Resultat ist in der folgenden Tabelle I zusammengestellt und in Fig. 1 anschaulich gemacht. Als



Figur 1.

Abszissen ist der Abstand zwischen Spalt und Einlage, als Ordinaten die Tonhöhe in Schwingungszahlen eingetragen. Der Druck im Gebläse war konstant gleich 10 mm Wasser, die Tonhöhe wurde mit einem Monochord bestimmt, das mittels Stimmgabel geeicht war.

Charakteristisch sind für diese Kurve wieder die Sprünge, die Wachsmuth ausführlich beschreibt, und die man hier noch weiter verfolgen konnte. Zu bemerken ist, daß die Kurve nur für eine Bewegungsrichtung der Einlage gezeichnet ist und zwar für die Richtung vom Keil fort; für die um-

gekehrte Bewegung verschiebt sich die Kurve etwas nach links, ohne daß jedoch der Grundcharakter geändert wird.

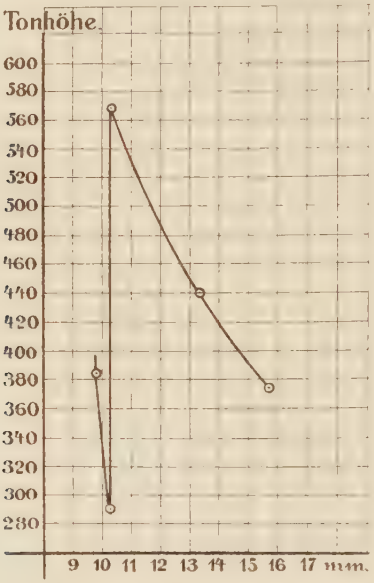
Tabelle I.

Abstand mm	Tonhöhe	Bemerkungen
6,1	321	
7,0	291	
7,3	518	1. Sprung
10,5	371	
12,4	304	
14,3	247—396	2. Sprung
16,2	366	
17,2	441	
19,4	410	3. Sprung

2. **Eine neue Art resonanzloser Klänge.** Diese Untersuchungen wurden mit verschiedenen, wulstartig gebildeten Einlagen ausgeführt: stets gab es einen Ton. Wenn man zur letzten Konsequenz übergeht, nämlich zu dem Fall, daß ein Luftblatt gegen eine senkrecht dazu aufgestellte Fläche strömt, so verliert das Wort Schneidenton offenbar seine Berechtigung. Und doch hört man auch unter diesen Bedingungen einen Ton. Diese eigenartigen Töne, die freilich nicht so kräftig sind wie die Schneidentöne, konnten genau bestimmt und die Luftbewegung auch objektiv sichtbar gemacht werden. Der Druck war wieder konstant gleich 10 mm Wasser. Die folgende Tabelle II und die Fig. 2 enthalten die Resultate einer Beobachtung.

Die Kurve zeigt dasselbe Verhalten wie bei den Schneidentönen: Bei einer Entfernung von 10,4 mm zwischen dem Spalt und der entgegenstehenden Fläche springt der Ton annähernd in die Oktave über. Weitere Sprünge lassen sich bei dem immerhin sehr schwach werdenden Tone nicht beobachten. Fig. 3 gibt die Reproduktion einer Zeichnung, die nach einer photographischen Aufnahme angefertigt worden ist. Die Photographie selbst

wurde nach der Schlierenmethode erzielt. Zur Markierung der Lamelle wurde dieselbe mit Ätherdämpfen versetzt. Andere Substanzen, die zur Sichtbarmachung verwendet



Figur 2.

wurden, wie die Dämpfe von wenig erhitztem Benzol und Methylalkohol, gaben zwar auch Schlieren; jedoch waren die Umrisse der Lamelle so ungenau, daß davon Abstand genommen werden mußte. Die Beleuchtung erfolgte durch

Tabelle II.

Abstand mm	Tonhöhe	Bemerkungen
9,9	382	
10,4	290 569	Sprung
13,3	441	
15,6	377	

eine Funkenstrecke mit Aluminiumelektroden, wobei zur Erhöhung der Lichtwirkung die Teslasche Schaltung zur Anwendung kam.

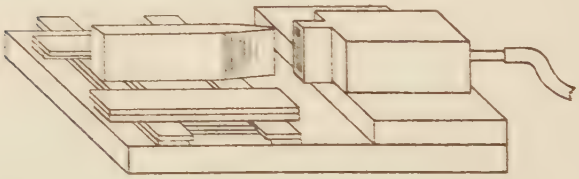
Die Zeichnung ist nach einer Photographie aus dem zweiten Intervall (d. h. nach dem ersten Sprung) gemacht. Sie zeigt zunächst, daß die Lamelle einige Zeit, bevor sie an die Fläche herankommt, zerfällt, dann aber auch deutlich, wie der sekundäre Teil, das erste „Band", um eine in der Mitte liegende Gleichgewichtslage pendelt, im ersten Augenblick die ganze Luftmasse nach links fließt, dort, um einen rechten Winkel abgelenkt, weiter wandert, im

Figur 3.

zweiten Augenblick ebenso nach rechts u. s. f. Bei dieser Pendelung ist offenbar der erste Teil der Lamelle, das „Blatt", gar nicht beteiligt, sondern nur das erste Band. Was die Kraft anlangt, welche die Pendelung aufrecht erhält, so kann man diese nur in dem Rückstau in der Mitte suchen, der die Gleichgewichtslage immer wieder zerstört. Zudem ist die Lamelle niemals absolut symmetrisch, und jedes kleine Überwiegen von Masse oder auch jeder Geschwindigkeitsunterschied entsprechender Stromfäden auf einer der beiden Seiten muß ein Umbiegen der ganzen Luftmasse bewirken.

3. **Einfluß einer seitlichen Verschiebung des Keiles innerhalb der Lamelle.** Es galt nun, weiter zu untersuchen, welchen Einfluß eine seitliche Verschiebung des (hier scharfen, oder doch nur wenig abgestumpften) Keiles

innerhalb der Lamelle auf die Tonbildung haben würde. Diese Untersuchung versprach um so wertvoller zu werden, da es eine alte Regel der Orgelbauer ist, das Labium nicht in die Mitte des Luftstromes, sondern bald weiter nach außen, bald weiter nach innen zu setzen. Schon Weerth[1]) hat diesem Punkte Aufmerksamkeit geschenkt; er beschreibt den Versuch wie folgt: „Geht man bei gleichbleibendem Abstand mit dem Keil allmählich durch die Lamelle, während Keilschneide und Spalt parallel bleiben, so erhält man zunächst einen Ton, dessen Höhe nach der Tabelle nicht dem Abstand entspricht, sondern die weitere Fortsetzung der tieferen Oktave. Der Keil steht so, daß die Hauptmenge der Luft an einer Seite vorbeigeht. Schiebt man den Keil weiter, so daß auf beiden Seiten des Keils ungefähr gleiche Luftmengen hinausströmen, so erhält man den dem Abstand entsprechenden Ton, der bei noch weiterem Verschieben wieder in die nächst tiefere Oktave



Figur 4.

umschlägt". Auch Wachsmuth[2]) berichtet über diese Erscheinung, ohne jedoch näher darauf einzugehen. Bei genauerer Untersuchung dieser Frage ist es vor allem wichtig, die Aufmerksamkeit auf präcise und gut meßbare Verschiebungen des Keiles zu richten. Um solche zu

[illegible] 18
[illegible] 47

rh alten, wurde über dem ersten Schlitten, der aus einer Glasplatte mit geschliffenen Kanten bestand, senkrecht zu seiner Führungsrichtung ein zweiter, ebensolcher angebracht (vgl. Fig. 4). Später, als sich dieser Apparat auch noch als zu ungenau erwies, wurde nach demselben Prinzip ein Apparat aus Messing angefertigt, bei dem die beiden Schlitten mit Schraubenführung versehen waren, und die seitliche Verschiebung, für welche größere Genauigkeit erforderlich war, noch einen Nonius trug. So konnte man ohne Schwierigkeit Verschiebungen bis 0,01 cm genau herstellen. Der Druck wurde während der ganzen Untersuchung konstant erhalten, was dadurch ermöglicht wurde, daß man den Anblasestrom nicht einem Balg — die hiesige Wasserleitung liefert einen zu geringen Druck — sondern einer Stahlflasche mit komprimierter Luft vermittels eines Reduzierventils entnahm[1]). Der Abstand zwischen Spalt und Schneide blieb zunächst während des Hindurchführens ebenfalls konstant, später erwies es sich als vorteilhafter, für einmal festgesetzte seitliche Einstellung die Lamelle der Länge nach zu untersuchen, d. h. den Abstand zu variieren.

Im allgemeinen ließ sich nun folgendes Verhalten des Tones ohne weiteres feststellen: In dem Gebiet vor dem ersten der früher beschriebenen Sprünge findet seitlich ein Umschlagen des Tones in die tiefere Oktave überhaupt nicht statt. In größerer Entfernung der Einlage vom Spalt, also jenseits des ersten Sprunges, ist das Umschlagen des Tones stets festzustellen; macht man jedoch den Spalt sehr eng, also die Lamelle sehr dünn (ca. 0,4 mm) so wird das Gebiet der tieferen Oktave sehr klein. — Das Gebiet des Tönens überhaupt wird bei größerer Entfernung immer größer, entsprechend der immer breiter werdenden Lamelle. Benutzt man einen vollkommen symmetrischen Blasekasten, so ist die Mittellinie überall die Stelle der besten Tongebung; bei unsymmetrischen Blasekasten verschiebt sich diese Stelle seitlich. Geht man von der Seite allmählich

[1]) Vgl. Wachsmuth l. c. p. 470.

nach dieser Linie zu, so nimmt nicht nur die Stärke des Tones, sondern auch seine Höhe zu. Dieses Zunehmen der Tonhöhe ist auch in dem Gebiet der tieferen Oktave festzustellen. Weitere Sprünge in höhere Obertöne, die sich öfters in der Nähe der Mittellinie einstellen, beruhen auf einer sehr geringen Neigung der Einlage gegen die Mittelebene der Lamelle. Sie lassen sich leicht durch ein geringes Drehen des Keiles um seine Längsachse beseitigen. Endlich ist die Bemerkung nicht überflüssig, daß man den Ton weiter verfolgen kann, wenn man von der Mitte ausgehend den Keil nach den Seiten verschiebt, als wenn man in umgekehrter Richtung vorgeht. Die Orte des Beginnes und Aufhörens des Tones sind also nicht identisch. Der Grund dieser Erscheinung ist der, daß das den Ton erzeugende Pendeln der Lamelle erst eines äußeren Anstoßes bedarf, um in Gang zu kommen.

Die Resultate einer solchen Messung sind in Tabelle III angegeben. Um zuverlässige Werte zu erhalten, muß der Druck während der ganzen Untersuchung der gleiche sein, da schon kleine Druckdifferenzen den Ton wesentlich beeinflussen. Deswegen durite die Untersuchung überhaupt nicht unterbrochen werden. Die Feststellung der Tonhöhe erfolgte wieder mit dem durch Stimmgabel geeichten Monochord. Durch häufige Übung — es wurden wohl über 500 Bestimmungen gemacht — erlangt man eine große Sicherheit in der Feststellung der Tonhöhe, und der mittlere Fehler betrug schließlich schätzungsweise nicht über 0,5%. Da der Blasekasten vollkommen symmetrisch gebaut war, stand zu erwarten, daß die Lamelle sich ebenfalls symmetrisch zur Mittelachse verhalten würde. Nachdem dies durch Vorversuche bestätigt war, konnte man darauf verzichten, die ganze Lamelle zu untersuchen. Die Tabelle gibt nur die Werte für eine Hälfte. Die Beobachtung selbst erfolgte in folgender Weise: Nachdem die Schneide genau in der Mitte eingestellt war, entfernte man sie vom Spalt bis zum ersten Auftreten des Tones und bestimmte in angemessenen Intervallen die Tonhöhe; dann wurde sie wieder dicht herangeschoben und seitlich aus der Mittelstellung um 0,5 mm

entfernt. Darauf wurde in derselben Weise die zweite Vertikalreihe gefunden u. s. f.

Tabelle III.

	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
3,4	848					
3,9	747	650				
4,4	663	585				
4,9	582	524				
5,4	510 1076	483				
5,9	991	435 883				
6,5	893	820				
6,9	841	758	368 736			
7,4	827	695	676			
7,9	725	654	625			
8,4	641	589	556	535		
8,9	550	521	488	493?		
9,9	764	463	431	426	403	
10,9	695	400 667	400 610	389 618	383	
11,9	625	589	541	541	332 502	
12,9	589	538	493	490	479	292
13,9	532	498			435	392

Aus dieser Tabelle sieht man schon bei oberflächlicher Betrachtung die Gestalt der Lamelle. Die Sprünge sind in jeder Vertikalreihe deutlich ausgeprägt; typisch ist der Umstand, daß die Sprünge, je näher der untersuchte Stromfaden der Mittelachse liegt, desto eher auftreten. Ferner ist der ziemlich beträchtliche Abfall der Tonhöhe in jeder Horzontialreihe bemerkenswert.

Noch besser kann man das eigentümliche Verhalten des Tones aus Figur 5 erkennen, wo als Abszissen die Abstände zwischen Keil und Spalt, als Ordinaten die Tonhöhen angegeben sind. Jede Kurve gibt dann das Verhalten eines Stromfadens. Hier gibt der Unterschied der Ordinaten für eine bestimmte Abszisse die Erhöhung des Tones nach der

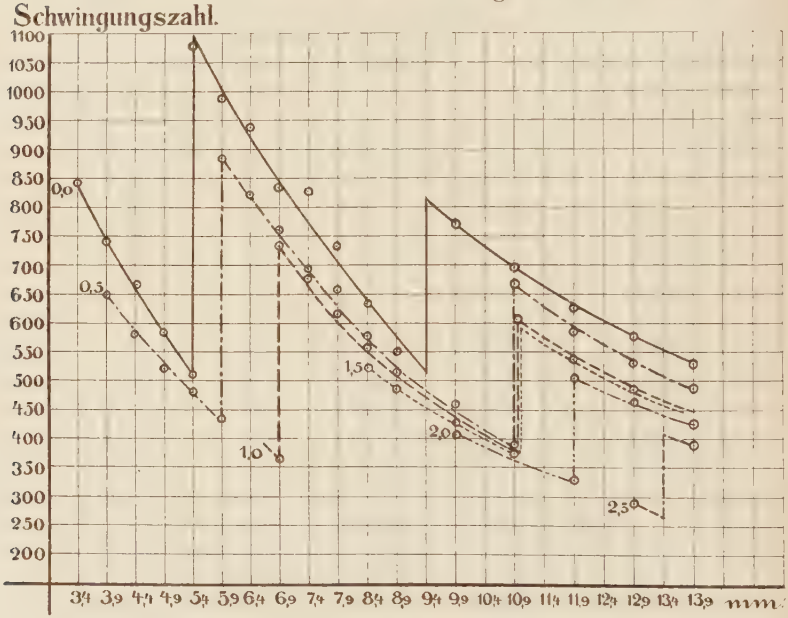
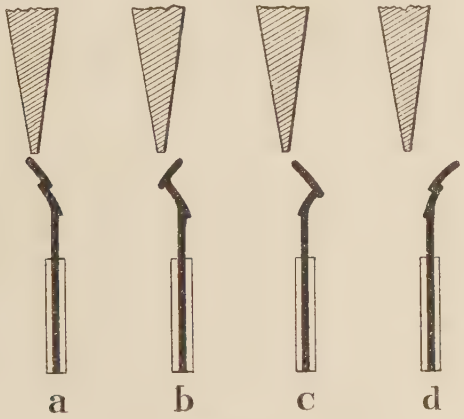


Fig. 5.

Mitte, der obersten Kurve zu. Die Figur zeigt aber besonders deutlich das Vorhandensein der seitlichen Sprünge: die Kurven 1,5 und 2,0 liegen im Beginn zu tief; sie stehen zur Kurve 0,0 in diesem Intervall beinahe im Verhältnis 1 : 2. Erst weiterhin springen sie in die normale Tonhöhe über.

4. **Versuch einer Erklärung der seitlichen Sprünge.** Dies seitliche Überspringen des Tones in die tiefere Oktave läßt eine Erklärung zu, die sich im wesentlichen auf die von Wachsmuth gegebene und durch seine Photographien begründete Erklärung der in der Längsrichtung auftretenden Sprünge stützt. Diese entstehen ja durch ein Zerfallen der

vorher einfach schwingenden Lamelle. Während nun der primäre Teil, das „Blatt“ — wenigstens in seinem oberen Teile - die ursprüngliche Schwingung beibehält, schwingt das halb so lange „Band“, der sekundäre Teil, doppelt so schnell. Nur dieser Teil schlägt rechts und links an den Keil. Verschiebt man nun den Keil genügend seitlich, so muß der in der beistehenden Figur 6a dargestellte Grenzfall eintreten, daß beide Schwingungen, die primäre des Blattes und die sekundäre des Bandes, nur wenn sie gleichzeitig denselben Schwingungssinn haben, den Keil erreichen.



Figur 6.

Man kann die ganze Schwingung in die gezeichneten vier Phasen zerlegen. Bei Mittelstellung des Keiles wird zweimal während der Schwingung ein Umschlagen der Lamelle auf die andere Seite des Keiles erfolgen, d. h. es wird die doppelte Schwingungszahl des Tones wie bei der Grundschwingung resultieren. Steht nun der Keil seitlich, so kann die Lamelle erst nach Vollendung der ganzen Periode über den Keil schlagen, man wird also dieselbe Tonhöhe wie bei der Grundschwingung vernehmen. Diese Erklärungsweise macht es ohne weiteres verständlich, daß die seitlichen Sprünge noch nicht in dem ersten Intervall auftreten können, da dort nur die einfache Schwingung herrscht.

II. Teil.

Labialpfeifen.

5. **Stellung des Labiums in der Pfeife.** Die vorstehenden Untersuchungen geben uns ein Mittel an die Hand, über gewisse Erscheinungen an Labialpfeifen Aufschluß zu erhalten. Zur Erzielung eines guten Tons ist die Stellung des Labiums innerhalb der Lamelle von großer Wichtigkeit. Man sieht aus den Beobachtungen von Nr. 3, daß das Optimum des Schneidentones in der Mitte liegt und zwar nicht nur in bezug auf Tonhöhe, sondern auch in bezug auf die Stärke des Tones. Diese ist ja nur von der Amplitude, im vorliegenden Fall also von der Masse der bei der Schwingung beteiligten Luft abhängig. Zu den obigen Versuchen wurde ein in jeder Beziehung symmetrischer Blasekasten verwendet, während die „Kerne" der Pfeifen meist unsymmetrisch sind. Die Folge davon ist, daß die Achse der Lamelle, d. i. die Linie des stärksten und höchsten Tones, nicht mehr in der Mitte liegt. Dies Verhalten wurde an einem Pfeifenkern nachgewiesen, der vom Pfeifenrohr abgeschnitten worden war. Die Luftlamelle hat die Zone besten Tönens bei normal gebauten Kernen stets nach innen. Will man die Symmetrie in der Lamelle wieder herstellen, so muß man, wie es die Orgelbauer bei vielen, besonders offenen Pfeifen zu tun pflegen, den vorderen Teil, die „Unterlippe", gegen den eigentlichen Kern etwas zurückschieben; dann ist die ganze Luftströmung mehr nach außen gerichtet. Um umgekehrt eine extreme Richtung nach innen zu erzielen, wie dies z. B. bei dem Pfeifenregister „Flauto traverso" notwendig ist, wird die Luft vorher künstlich im Bogen nach vorn und dann schräg nach dem Innern der Pfeife geleitet; dadurch wird ein sehr leichtes Überschlagen in die höhere Oktave bewirkt.

Nun wird die anfängliche Ausströmungsrichtung aber bei keiner Pfeife innegehalten, da die Lamelle auch von der Luftströmung in der Pfeife beeinflußt wird. Beim Schneidenton, bei dem keine äußeren störenden Luftströmungen die Lamelle beeinflussen, bleibt der größte Teil des Blattes still und nur

die unmittelbar vor dem Keil gelegene Partie, auf die der Rückstau noch wirken kann, gerät in Bewegung. Dieser Schwingungstypus muß sich ändern, wenn man die Lamelle mit dem abgeschlossenen Pfeifenraum in Verbindung bringt. Die Resonanz der großen schwingenden Luftmasse wie die Strömungen der Luft setzen auch das steifere Blatt in eine sichtbare, pendelnde Bewegung. Vor allem ist es der unterste Wirbel, den schon van Tricht[1]) beschreibt, der auf die ganze Breite der Lamelle einwirkt. Er bewirkt, daß die Lamelle überhaupt nicht mehr zerfällt, oder doch das Blatt samt allen abgespaltenen Bändern in Grundschwingung sich hin- und herbewegt. Voraussichtlich ist bei genügendem Drucke letzteres der Fall, denn die „Bäumchen" Wachsmuths lassen sich am einfachsten als eng übereinandergelagerte Bänder auffassen[2]). Außerdem drückt dieser Wirbel die ganze Lamelle nach außen, was besonders bei gedeckten Pfeifen schädlich ist, ja den Ton oft ganz verschwinden macht. Durch Verschiebung des Labiums kann einmal die Mittelstellung wieder erreicht, dann aber auch der Druck im Pfeifenkörper reguliert werden.

6. **Unterschied zwischen offener und gedackter Pfeife.** Für die offene Pfeife ist charakteristisch, daß an dem oberen offenen Ende, wo sich ein Schwingungsbauch befindet, der Druckunterschied mit der äußeren Luft gleich Null ist. Ist der Druck etwas größer, so strömt Luft nach außen, ist er etwas kleiner, so strömt Luft hinein[3]). Durch Regulierung des Luftzuflusses, also durch Verschiebung des Labiums, kann man jenen Grenzpunkt erreichen. Dabei kommt die Lippe ziemlich weit nach innen zu stehen, fast stets so weit, daß die Stärke und der

[1]) l. c. p. 54.

[2]) Diese Erklärungsweise bietet den Vorteil, daß sie in dem Anschlag der einzelnen Bänder während des Vorüberstreichens des in Grundschwingung das Labium passierenden Bäumchens bereits das Anregen der harmonischen Obertöne vorsieht. Da nämlich bei Überdruck die Lamelle steifer wird, werden die einzelnen Bänder mehr auseinandergezogen und befähigt, die Eigenschwingung einzugehen.

[3]) Vgl. dazu: Brockmann, Wied. Ann. 31, p. 78. 1887.

Klang schon beeinträchtigt werden. Die Höhe des Schneidentones ist ja zwangsweise durch den resonierenden Pfeifenkörper bestimmt. Da das gute Ansprechen für die Pfeife das Wichtigste ist, setzt man das Labium nicht ganz so tief als es sitzen müßte, und daher kommt es, daß bei den meisten offenen Pfeifen ein Luftstrom nach außen zu konstatieren ist.

Dackt man nun eine so eingerichtete Pfeife, die freilich nicht zu eng mensuriert werden darf, so spricht sie zunächst gar nicht, oder doch nicht auf den Grundton an. Schiebt man jedoch das Labium nach außen, so ertönt laut und klar der Grundton. Es gelangt eine größere Luftmasse in die Pfeife, die den erforderlichen Druck herstellt. Durch diesen Druck wirkt die Luft in der Pfeife auf die Lamelle und zwingt sie zu größeren Exkursionen, also zu einer kleineren Schwingungszahl in der Sekunde. Da die Pfeife nur auf Töne der vorliegenden harmonischen Reihe resonieren kann, wird die Lamelle in der doppelt so langen Periode schwingen, und nun bildet sich in der Pfeife die zugehörige stehende Schwingung mit einem Knoten am oberen Ende. Diese Erklärung macht es verständlich, daß die Lippe bei allen gedackten Pfeifen, bei den einen mehr, bei den anderen weniger weit nach außen sitzt. Auch beim „Lieblich gedackt" sitzt tatsächlich, wie Hensen bemerkt, das Labium nach außen. Hier geht also die Luft zunächst völlig an der Schneide vorbei, und dabei kann auch kein Ton entstehen. Innen ist nun ein abgeschlossenes Volumen, in dem eine Verdichtung eintritt, da sogar Luft von außen nach innen gesaugt wird (vgl. weiter unten). Durch die Verdichtung erleidet die Lamelle sofort eine Ablenkung nach außen, trifft nun den Keil (und zwar bereits bei vollem Druck) bildet hier den Schneidenton, und nun kommt wie üblich die Resonanz zu Hülfe, um entweder die hier gebildete Oberschwingung oder den zugehörigen Grundton zu verstärken.

Vergleich einer Labialpfeife mit einem angeblasenen Resonator. Hensen ist an der oben unter 2) zitierten Stelle geneigt, eine Übereinstimmung des Tönens

der Labialpfeife mit dem eines „angeblasenen“ Resonators anzunehmen. Eine innere Reibung soll dabei die Ursache der akustisch wirksamen, also periodischen Luftbewegung sein. Diese an sich schon unwahrscheinliche Erklärung wurde in neuester Zeit durch einige Beobachtungen widerlegt, die K. von Wesendonk[1]) über Flaschentöne machte. Er äußert sich dort wie folgt: „Nach meinem Befunde ist es im allgemeinen wesentlich, daß der Luftstrom, den man mit Rauch sichtbar machen kann, auf den gegenüberliegenden Rand der Flaschenmündung b möglichst kräftig auftritt und daselbst quasi zerstäubt, ohne aber direkt in die Flasche hineinzublasen, sondern wesentlich über die Mündung hinwegstreicht“. von Wesendonk scheut sich jedoch, bei diesem Phänomen Schneidentöne anzunehmen, da ja keine Schneide vorhanden ist. Am Schluß seiner Mitteilung spricht er aber die Vermutung aus, daß ein alternierendes Aus- und Einströmen der Luft beim Anblasen der Flasche stattfindet; im Drehspiegel zeige eine hineingehaltene Kerzenflamme doch anscheinend ein Hinein- und Herausströmen der Luft mit Bestimmtheit an, wenigstens an manchen Stellen. Nun ist oben unter Nr. 1 gezeigt, daß es gar nicht notwendig ist, daß der Strom gegen eine scharfe oder annähernd scharfe Schneide fließt, sondern auch Wulste, die beliebig dick sein können, lassen Töne hören. Es ist gezeigt worden, daß ein prinzipieller Unterschied zwischen diesen Tönen und den Schneidentönen nicht besteht. Man kann deshalb sehr wohl die von K. von Wesendonk beobachteten Flaschentöne mit Hülfe derselben schönen Theorie erklären, wie sie Wachsmuth für die Labialpfeifen entwickelt hat. Auf dieselbe Weise ist dann auch die von Hensen erwähnte Erscheinung zu erklären, zumal der Luftstrom stets unter einem bestimmten, oder doch nur wenig zu variierenden Neigungswinkel gegen den Rand geblasen werden muß, damit ein Ton entsteht. Der angeblasene Resonator fällt also unter dieselbe Klasse

[1]) „Einige Beobachtungen über Flaschentöne“, Naturw. Rundschau, 20. Jahrg. p. 389. 1905.

tongebender Instrumente, die Wachsmuth als prinzipiell mit den Labialpfeifen übereinstimmend behandelt hat.

8. **Bedeutung der sekundären Ströme.** Es ist natürlich, daß die mit großer Geschwindigkeit aus dem Spalt austretende Lamelle die benachbarten Luftteilchen mit fortreißt. So entstehen die von Hensen als „sekundäre Ströme" bezeichneten Bewegungen der inneren und äußeren Luft, die auf die Tonbildung ebenfalls von Einfluß sind. Sie wirken mit gleichen, aber entgegengesetzt gerichteten Kräften auf die Lamelle und halten sich deshalb das Gleichgewicht. Da die Lamelle sich abwechselnd dem einen oder anderen sekundären Strome zuneigt, drücken sie auch abwechselnd stärker und schwächer. Hensen ist der Ansicht, daß diese Ströme überhaupt erst die Pendelung bewirken und deshalb das Wesentliche bei der Entstehung des Pfeifentones sind. Wenn man nämlich an der hinteren Wand der Pfeife den inneren sekundären Strom durch eine heiße Flamme zerstört, oder ihn durch eine vorgelegte Platte, eine Art Wehr, am Kern der Pfeife ablenkt, verschwindet der Ton. Nun hat aber schon Wachsmuth[1]) gezeigt, daß es sich in diesem Falle nur um eine Ablenkung der Ortholamelle handelt, daß also der äußerer sekundäre Strom, der jetzt das Übergewicht hat, die Lamelle einfach nach innen drückt; man braucht nur das Labium etwas nach innen zu verschieben, um den Ton wieder zu erhalten. Die gleiche Erscheinung konnte für den äußeren sekundären Strom nachgewiesen werden. Es wurde, nach der Angabe von Hensen[2]) eine dünne Holzplatte mit der vorderen Kante immer genau parallel der äußeren Kante des Spaltes, von diesem aus allmählich höher geschoben; in etwa $^1/_3$ Höhe der Mundöffnung erlosch der Ton und nur ein zischendes Geräusch war vernehmlich. Nun wurde das (verschiebliche) Labium etwas nach vorn gezogen und die Pfeife ertönte von neuem. Die von Hensen berichtete Erscheinung, daß bei Verschiebung der Platte bis zur Mitte der Mundöffnung der erste Oberton zu

[1]) l. c. p. 489.
[2]) siehe oben p. 8.

hören ist, konnte nur erhalten werden, wenn man die Platte etwas tiefer in die Lamelle hineinschob. Dann aber vertritt einfach diese Platte das Labium, daß seine Funktion verloren hat, und der Pfeifenkörper resoniert auf den in halbem Abstand schwingenden Schneidenton. Es ist übrigens die Tatsache interessant, daß auch der praktische Orgelbau von der richtenden Kraft — denn eine solche ist nach dem Gesagten allein möglich — der sekundären Ströme in neuerer Zeit auch Gebrauch macht. Man findet bei einigen offenen Registern sogenannte „Bärte", entweder Schneidenbärte bei solchen Registern, denen eine helle, scharfe Klangfarbe eigentümlich ist, das sind Metallstreifen, die dicht neben der Austrittsöffnung der O-Lamelle unter einem Winkel von etwa 45° angebracht werden und bestimmt sind, die Lamelle weiter nach außen zu lenken — wie es mit den obigen Ergebnissen für offene Pfeifen im Einklang steht; — oder sogenannte „Rollbärte", kleine Holzwalzen, die demselben Zweck dienen. Sie bewirken außerdem dadurch, daß die Lamelle sich nicht an einer scharfen Kante brechen kann, einen minder scharfen, volleren Ton.

Die sekundären Ströme schmiegen sich an die Lamelle, der sie ja ihre Entstehung verdanken, eng an; man kann sogar nachweisen, daß sie an der Pendelung beteiligt sind. Es gelangt bei jeder Exkursion der Lamelle Luft von außen hinein bezw. von innen nach außen. Das erste hat schon Maltézos [1]) bewiesen, indem er Dämpfe von Chlorammonium in die Nähe der Pfeifenmündung brachte; an der inneren Seite hatte sich nach dem Tönen festes Chlorammonium abgesetzt. Das zweite beweist ein einfacher Versuch. Füllt man nämlich eine gedackte Pfeife mit Rauch, so verschwindet dieser allmählich, während die Pfeife tönt; er muß also mit dem inneren sekundären Strome herausgerissen worden sein. Dieselbe Erscheinung beobachtete übrigens auch K. von Wesendonk [2]) an Flaschen, die er mit Rauch füllte und

[1]) Maltézos, Comptes rendus T. 134, p. 701.

[2]) l. c. p. 390.

anblies. Daraus ist zu schließen, daß die sekundären Ströme zur Verstärkung der Lamelle beitragen, und daß, weil größere Luftmassen in die Pendelung hineingezogen werden, der Ton dadurch kräftiger wird.

Schlussbemerkung.

Aus den vorstehenden Untersuchungen ist also als Resultat gewonnen: 1) Die durch die Pendelung einer Luftlamelle erzeugten Töne sind nicht auf den Fall beschränkt, daß die Einlage der Lamelle eine keilförmige Schneide ist; vielmehr hat diese Familie resonanzloser Klänge eine viel allgemeinere Bedeutung. 2) Die Entstehung des Tones in Labialpfeifen und allen nach demselben Typus gebauten, Ton gebenden Instrumenten läßt sich völlig einwandfrei durch die von Wachsmuth aufgestellte Theorie der Schneidenklänge erklären. Die noch sonst in der Pfeife vorhandenen Luftbewegungen haben nur sekundäre Bedeutung.

Zu der vorliegenden Arbeit wurde ich durch die Untersuchungen von Herrn Prof. Dr. Wachsmuth über Lamellentöne und Labialpfeifen angeregt. Ihm, der mir stets in liebenswürdigster Weise mit Rat und Tat zur Seite gestanden, sage ich auch an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank.

Auch Herrn Prof. Dr. Martens danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Referates.

Herrn Ingenieur O. Hauenstein, der mir bei der Anfertigung der Figuren schätzbare Dienste geleistet, bin ich auch zu großem Dank verpflichtet.